

НУЖНО ЛИ ЗАЗЕМЛЯТЬ НЕЙТРАЛЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ШАХТАХ?

(В порядке обсуждения)

Р. Ф. ТРОФИМОВ

Вопрос о системах с заземленной и изолированной нейтралью трансформаторов не может считаться окончательно разрешенным. До настоящего времени не существует определенных регламентаций по вопросу о заземлении нейтрали. Это относится не только к шахтным сетям, но и к сетям всех поверхностных промышленных предприятий. На шахтах СССР преимущественно распространены системы с изолированной нейтралью. В системах с наглухо заземленной нейтралью ток, могущий проходить через человека, стоящего на земле и касающегося фазного провода, может быть определен по формуле (1):

$$I = \frac{U_{\phi}}{R + r_0 + r_1}, \quad (1)$$

где U_{ϕ} — фазовое напряжение в вольтах;

R — полное сопротивление человека, прикоснувшегося к фазному проводу, в омах, могущее принимать значение для людей, работающих в шахтах, порядка 600—800 ом;

r_0 — сопротивление заземления нейтрали и

r_1 — сопротивление фазного провода.

Обыкновенно r_0 и r_1 бывают очень малыми по сравнению с R и ими можно пренебречь. При этом

$$I = \frac{U_{\phi}}{R},$$

т. е. ток, протекающий через человека, определяется величиной фазового напряжения, сопротивления тела человека и не зависит от активной и емкостной проводимостей между фазными проводами и землей.

Для систем с изолированной нейтралью токи, могущие проходить через человека, стоящего на земле и касающегося фазного провода, могут быть определены по формуле (2):

$$I = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\lambda}}{\sqrt{(3R + r')^2 + (3R \cdot r' \cdot \omega C)^2}}, \quad (2)$$

где U_{λ} — линейное напряжение в вольтах;

r' — сопротивление изоляции сети в омах;

C — емкость этой сети в фарадах;

ω — угловая скорость.

Копытов Н. В. дает свою формулу (3):

$$I = \frac{U_{\phi}}{R \cdot \sqrt{1 + \frac{r'(r' + 6R)}{9(1 + r'^2 \cdot \omega^2 C^2) \cdot R^2}}}. \quad (3)$$

В последнее время возникла тенденция разрешать вопрос о преимуществах или степени опасности той или иной системы экспериментальным пу-

Таблица 1

№ участ- ков	Напряже- ние в сети	Токи в ма, могущие проходить через человека, стоящего на земле и касающегося фазного провода, при сопротивлениях человека в омах														
		1 фаза					2 фаза					3 фаза				
		600	1000	2000	4000	6000	600	1000	2000	4000	6000	600	1000	2000	4000	6000
18	380	50	43	37	32	28	43	40	37	30	27	43	40	36	31	27
20	220	72	59	43	30	20	70	54	39	25	19	74	65	45	30	21
8	220	42	38	30	17	9	53	42	32	19	10	51	44	34	20	11
11	220	8	7	5	4	2	10	9	8	6	4	11	10	9	8	5
12	220	33	20	6	0	0	320	220	96	45	32	320	230	100	48	35
22	220	35	31	25	13	9	25	22	17	9	6	40	37	31	20	11
10	380	220	150	94	47	35	220	150	93	47	34	210	150	90	45	33
19	380	13	12	11	10	9	13	12	11	10	9	13	12	11	10	9
23	380	33	30	25	20	12	45	37	32	22	18	41	40	30	20	14
23	220	32	30	22	16	10	38	36	30	20	15	35	33	29	20	12
26	220	38	35	30	20	11	34	33	28	19	10	31	29	22	13	9
15	220	3	2	1	0.9	0.5	3	2	1	0.9	0.5	2	1	0.9	0.8	0.5
17	220	190	120	100	48	40	180	160	100	0	0	100	95	100	46	40
25	220	35	30	23	16	11	35	32	25	16	11	36	35	25	16	11
9	220	150	83	46	27	21	160	92	51	30	23	150	82	46	27	20
16	220	65	43	35	25	26	72	50	41	31	27	20	10	9	5	3

тем. С целью выявления степени опасности электрических систем и с изолированной нейтралью при напряжениях 220 и 380 вольт были произведены экспериментальные исследования участков электрических сетей на нескольких сибирских угольных шахтах. Замерялись токи, могущие проходить через человека, стоящего на земле и касающегося фазного провода. Было обследовано около 150 участков. Экспериментальные исследования проводились по схеме, изображенной на рис. 1. При этих исследованиях человек заменялся сопротивлениями в 600, 1000, 2000, 4000 и 6000 ом. Результаты замеров, произведенных на шахте № 1, указаны в табл. 1.

Если классифицировать несчастные случаи при токах, могущих проходить через человека, до 30 ма, как легкие, от 30 до 50 ма, как средние, от 50 до 100 ма, как тяжелые, и свыше 100 ма, как смертельные, то степень опасности сетей для 7 шахт с круглым падением можно видеть из данных, приведенных в табл. 2. Результаты замеров, произведенных на шахте № 2 с пологим падением, приведены в табл. 3.

Таблица 2

Название шахт	Виды несчастных случаев	Возможные несчастные случаи в процентах при сопротивлениях человека в омах и напряжениях в сети в вольтах									
		600		1000		2000		4000		6000	
		220	380	220	380	220	380	220	380	220	380
№ 1	Легкие	22	25	33	33	56	42	86	58	89	75
	Средние	36	42	36	42	22	33	14	42	11	25
	Тяжелые	22	8	20	0	16	25	0	0	0	0
	Смертельные	20	25	11	25	0	0	0	0	0	0
№ 4	Легкие	22	—	22	—	22	—	22	—	22	—
	Средние	0	—	0	—	0	—	22	—	56	—
	Тяжелые	0	—	22	—	22	—	56	—	22	—
	Смертельные	78	—	56	—	56	—	0	—	0	—
№ 5	Легкие	34	29	67	29	67	38	100	79	100	79
	Средние	33	4	0	21	33	42	0	21	0	21
	Тяжелые	33	42	33	42	0	12	0	0	0	0
	Смертельные	0	25	0	8	0	8	0	0	0	0
№ 6	Легкие	50	40	50	61	50	61	50	74	50	74
	Средние	0	27	0	13	0	13	50	0	50	7
	Тяжелые	0	7	33	0	33	13	0	26	0	19
	Смертельные	50	26	17	26	17	13	0	0	0	0
№ 3	Легкие	41	0	41	0	48	34	89	34	93	34
	Средние	19	34	22	34	48	0	11	66	7	66
	Тяжелые	40	33	37	33	4	66	0	0	0	0
	Смертельные	0	33	0	33	0	0	0	0	0	0
№ 7	Легкие	0	50	0	50	67	50	100	67	100	100
	Средние	67	0	100	0	33	50	0	33	0	0
	Тяжелые	33	42	0	50	0	0	0	0	0	0
	Смертельные	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
№ 8	Легкие	11	56	22	56	22	56	56	56	67	56
	Средние	11	0	0	0	34	0	44	22	33	22
	Тяжелые	0	0	56	0	44	22	0	22	0	22
	Смертельные	78	44	22	44	0	22	0	0	0	0

Таблица 3

Наименование участковых подстанций	Напряже- ние в сети	Токи в ма, могущие проходить через человека, стоящего на земле и касающегося фазного провода, при сопротивлениях человека в омах														
		1 фаза					2 фаза					3 фаза				
		600	1000	2000	4000	6000	600	1000	2000	4000	6000	600	1000	2000	4000	6000
1. Тяговая п/с (питание вы- работки)	380	210	160	92	47	30	210	160	91	48	30	210	160	91	47	30
2. Западная № 1	"	230	200	130	56	36	220	190	130	50	36	220	190	130	52	35
3. Восточная № 1	"	65	60	52	38	30	65	60	52	39	31	64	59	51	37	29
4. Тоже 2-я	"	210	180	120	52	34	210	180	120	53	35	210	180	120	52	34
5. 26-й подэтажный	"	154	130	87	48	32	155	130	88	48	32	150	125	82	45	31
6. Снежки	"	36	35	34	31	26	36	35	34	31	26	37	36	34	32	27
7. № 4	"	49	47	43	37	31	49	47	43	37	31	48	46	42	37	31
8. Западная № 5	"	130	117	93	53	34	130	116	93	51	35	130	117	93	53	34
9. Восточная № 6	"	633	380	190	95	63	633	380	190	95	63	0	0	0	0	0
10. Западная № 7	"	633	380	190	95	63	0	0	0	0	0	633	380	190	95	63
11. 2 Западная (7а)	"	100	87	62	41	33	100	87	62	41	33	99	86	63	43	37

Обобщающие данные о степени опасности электрических систем с изолированной и заземленной нейтралью, с точки зрения электрического удара, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Виды несчастных случаев	Возможные несчастные случаи в процентах при сопротивлениях человека в омах и напряжениях в сети в вольтах									
	600		1000		2000		4000		6000	
	220	380	220	380	220	380	220	380	220	380
1. Системы с изолированной нейтралью										
а) для шахт с крутым падением										
Легкие	29	33	37	39	49	46	78	66	81	73
Средние	24	16	22	17	30	27	17	27	17	21
Тяжелые	23	25	29	24	15	20	5	7	2	6
Смертельные . . .	24	26	12	20	6	1	0	0	0	0
б) для шахт с пологим падением										
Легкие		—		—		—		—		9
Средние		19		18		18		57		72
Тяжелые		13		18		40		43		19
Смертельные . . .		68		64		42		—		—
2. Системы с заземленной нейтралью										
(на основании подсчетов)										
Легкие	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0
Средние	0	0	0	0	0	0	100	0	0	100
Тяжелые	0	0	0	0	100	0	0	100	0	0
Смертельные . . .	100	100	100	100	0	100	0	0	0	0

На основании этих данных можно сделать вывод, что системы с изолированной нейтралью безопаснее систем с заземленной нейтралью в отношении электрического удара. При этом приходится учитывать и другое обстоятельство, а именно: очень частые случаи глухих однофазных замыканий на землю. Последнее можно подтвердить данными табл. 5, относящимися к участковым сетям шахты № 3.

Таблица 5

Числа апреля 1945 г.	№ участковых подстанций, имевших глухое однофазное замыкание на землю
4	4, 18
5	13, 8, 19, 5, 7
6	13, 5, 7, 20
8	13, 8, 20, 19, 5, 7
9	8, 10
10	5, 19
11	13, 20, 19, 7, 10
12	10, 7, 17
13	7, 17, 10, 20

Однофазные замыкания на землю по месяцам, имевшие место на этой шахте, иллюстрируются данными, приведенными в табл. 6.

Во время однофазных замыканий на землю здоровые провода находятся под линейным напряжением относительно земли. Почти такое же положение и на других шахтах. При этом нужно отметить, что однофазных замыканий на землю во время экспериментальных исследований было обнаружено боль-

Таблица 6

Наименование месяцев	Количество однофазных замыканий
1944 г.	
Апрель	31
Май	31
Июль	21
Август	20
Сентябрь	22
Октябрь	13
Ноябрь	20
Декабрь	18
1945 г.	
Январь	39
Февраль	24
Март	27
Апрель	53
Май	42
Октябрь	23
Ноябрь	19
Декабрь	38
1946 г.	
Январь	19
Февраль	22
Март	21

ше в сетях, работающих при напряжении 220 в, а не 380 в, как это можно было ожидать.

Из данных, приведенных в табл. 5 и 6, видно, что однофазные замыкания на землю очень долго не устраняются (до 7—8 дней). Сети, работающие в таком состоянии, создают опасность не только в отношении электрического удара, но и в отношении взрывов и пожаров, так как токи замыкания на землю бывают равны от 0.1 до 0.6 а (на основании замеров).

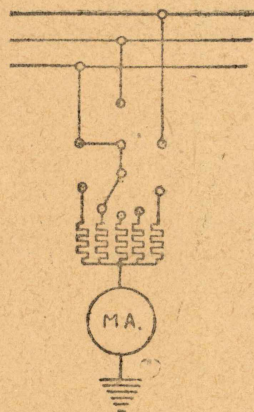


Рис. 1

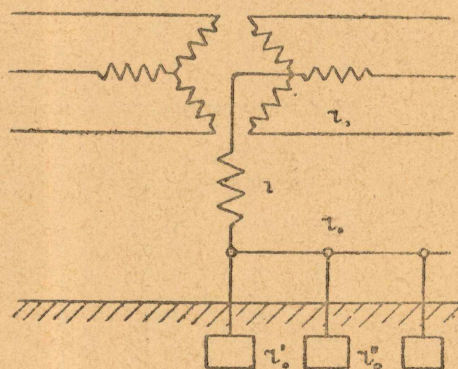


Рис. 2

Если учесть еще и существующие способы контроля состояния изоляции, обнаружения мест повреждения, опасность двойных и двухфазных замыканий на землю и невозможность осуществления простой защиты от замыкания на землю, кроме защит, обладающих большой чувствительностью, то систему с изолированной нейтралью можно считать равноценной другой системе. Наиболее рациональной системой для шахт следует признать зануление через сопротивление порядка 50—100 ом с многократным заземлением (рис. 2). Такое сопротивление ограничит ток замыкания на землю до

тока, образующего дугу (до 3—5 а), при котором можно осуществить чувствительную и селективную защиту от замыкания на землю.

Для систем с занулением без сопротивления r (глухое) и с однократным заземлением, у которых мощность потребителей незначительна по сравнению с мощностью источника, можно допустить, что при коротких замыканиях напряжение остается неизменным и тогда аварийный ток будет равен:

$$I_0 = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3} \cdot (r_0 + r_1)}, \quad (4)$$

где r_0 — сопротивление нулевого провода и r_1 — сопротивление фазного провода.

Реактивным сопротивлением проводов, как оказывающим незначительное влияние на величину напряжения прикосновения, можно пренебречь.

Из уравнения (4) следует:

$$\frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} = I_0 \cdot r_0 + I_0 \cdot r_1.$$

Заменив $I_0 \cdot r_0 = U_{\text{пр}}$, получим

$$\frac{r_1}{r_0} = \frac{U_\lambda - \sqrt{3} \cdot U_{\text{пр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{пр}}} = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{пр}}} - 1, \quad (5)$$

где $U_{\text{пр}}$ — напряжение прикосновения = 40 в.

Для шахт при напряжениях 500/290 в необходимо бы иметь $\frac{r_1}{r_0} = 6.26$;

при напряжениях 380/220 в — $\frac{r_1}{r_0} = 4.5$ и при напряжениях 220/127 в —

$\frac{r_1}{r_0} = 2.17$, т. е. нулевой провод должен иметь сечение, превосходящее в несколько раз сечение фазных проводов.

В системах, имеющих два заземлителя (в начале и конце сети) падения напряжения в нулевом и фазном проводах будут прямо пропорциональны их сопротивлениям

$$\frac{U_0}{U_1} = \frac{r_0}{r_1}$$

и в заземлителях напряжение прикосновения

$$U'_{\text{пр}} = U''_{\text{пр}} = \frac{U_0}{2} \quad (\text{при } r_0' = r_0'').$$

Согласно 2-му закону Кирхгофа

$$U_0 + U_1 = U_\phi, \quad (6)$$

но

$$U_1 = U_0 \cdot \frac{r_1}{r_0}$$

или после подстановки в уравнение (6)

$$U_0 + U_0 \cdot \frac{r_1}{r_0} = U_\phi$$

и

$$U_0 \left(1 + \frac{r_1}{r_0} \right) = U_\phi.$$

или

$$2 \cdot U'_{\text{пр}} \left(1 + \frac{r_1}{r_0} \right) = U_{\text{ф}}.$$

Откуда

$$U'_{\text{пр}} = U''_{\text{пр}} = \frac{\frac{U_{\text{ф}}}{2}}{1 + \frac{r_1}{r_0}} = \frac{\frac{U_{\text{ф}}}{2}}{1 + \frac{q_0}{q_1}}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что чем больше сечение рабочих жил, тем опаснее обслуживание приемников тока.

Для получения допустимого напряжения прикосновения $U_{\text{пр}} = 40$ в сечение нулевого провода должно быть больше сечений фазных проводов. Это можно доказать, воспользовавшись последним уравнением

$$U_{\text{пр}} = \frac{\frac{U_{\text{ф}}}{2}}{1 + \frac{q_0}{q_1}} = \frac{U_{\text{ф}} \cdot q_1}{2(q_1 + q_0)},$$

или

$$U_{\text{пр}} \cdot 2 \cdot q_1 + U_{\text{пр}} \cdot 2 \cdot q_0 = U_{\text{ф}} \cdot q_1.$$

Откуда

$$q_0 = \frac{U_{\text{ф}} \cdot q_1 - U_{\text{пр}} \cdot 2 \cdot q_1}{2 \cdot U_{\text{пр}}} = \frac{U_{\text{ф}} \cdot q_1 - 80 \cdot q_1}{80},$$

или окончательно

$$q_0 = q_1 \left(\frac{U_{\text{ф}} - 80}{80} \right). \quad (8)$$

Для напряжений	$U_1 = 500$ в	должно быть	$q_0 = 2.63 \cdot q_1$
"	$= 380$ в	"	$q_0 = 1.75 \cdot q_1$
"	$= 220$ в	"	$q_0 = 0.588 \cdot q_1$

т. е. сечение нулевого провода для напряжений 500 в и 380 в должно быть больше сечения фазных проводов.

В системах с занулениями напряжение прикосновения находится в прямой зависимости и от мощности силовых трансформаторов и оно может превосходить допустимое напряжение прикосновения $U_{\text{пр}} = 40$ в в несколько раз. Для получения допустимого напряжения прикосновения нужно тоже брать сечения нулевых проводов, превосходящее сечение фазных проводов.

Применяя ограничения аварийных токов, предположим, до 5 а, через сопротивление r , сопротивление нулевого провода и заземления будет равно

а) для однократного заземления

$$r_0 = \frac{U_{\text{пр}}}{I_0} = \frac{40}{5} = 8 \text{ ом},$$

б) для двукратного заземления

$$r_0 = \frac{2 \cdot U_{\text{пр}}}{I_0} = \frac{2 \cdot 40}{5} = 16 \text{ ом},$$

что значительно больше сопротивлений рабочих проводов и, следовательно, сечение нулевого провода придется выбирать не из условий допустимого напряжения прикосновения, а из условий механической прочности, и вообще при этом устраняются только что отмеченные недостатки, присущие си-

системам с занулением. Кроме того, применение систем с занулением и ограничением аварийных токов позволит в шахтах применять защитные заземления с сопротивлением более 2 ом, в чем также есть необходимость.

Многократное заземление имеет своей целью не столько разгрузить нулевой провод (по току) при однофазных замыканиях, сколько не допустить образования значительных напряжений прикосновений при обрыве нулевого провода, что имеет место в системах с занулением и однократных заземлениях.

При анализе электрических систем необходимо воспользоваться данными Л. П. Подольского, который сообщает, что при напряжениях 250 вольт и выше величина сопротивления кожи человека мало зависит от ее влажности и что при напряжениях 250 вольт и выше имели место резко выраженные явления электрического пробоя кожи, после которого следовало непосредственное соприкосновение электродов с хорошо проводящими тканями тела человека и значит резкое увеличение тока, проходящего через человека, нанося ему травму. Что касается пожаров, то Л. П. Подольский сообщает, что „пожар вызывается не джаулевым теплом, а перемежающейся или же стойкой дугой, условия возникновения и поддержания которой зависят от величины разности потенциалов между её электродами“. Взрывы рудничной атмосферы в шахтах могут быть вызваны искрой, защиты от которой отсутствуют, и они невыполнимы. Однако, известно, что прерывание цепи тока утечки между металлическими проводниками и почвой выработок может послужить причиной взрыва газа только при дуге, для образования которой необходим ток силой 5 а. Мало вероятно, что бронированные кабели дадут открытые дуги, гибкие же кабели чаще всего располагаются на почве выработок или близко к ней, и поэтому взрыв рудничной атмосферы может произойти только при токе замыкания на землю, как указано выше, 5 а и выше.

Кроме этих факторов, нужно учесть опасность блуждающих переменных токов. Основной опасностью блуждающих переменных токов является преждевременное взрывание электродетонаторов при случайном касании концов или оголенных мест взрывной цепи с почвой.

Согласно данным В. М. Федоренко, „применяемые в настоящее время на шахтах электродетонаторы имеют сопротивление порядка 1—2 ома, взрываются, как показали опыты, при напряжениях порядка 1 вольта и токе, равном 0.35—0.40 ампера“.

Заключение

Теоретические исследования приводят к тому, что более рациональной системой должна являться система с изолированной нулевой точкой трансформатора. Такая система принята на шахтах СССР.

Экспериментальные исследования и данные эксплуатации, как указано выше, это опровергают и доказывают обратное. В связи с этим от таких систем можно отказаться, пересмотрев правила технической эксплуатации, и перейти к занулениям через сопротивления и с многократными заземлителями. Это повысит безопасность работы в шахтах, даст возможность ввести селективную защиту от замыкания на землю и перейти на более высокое напряжение (до 660 в) при наличии экранированных сеток, в чем назрела необходимость.

Что касается взрывов и пожаров, то системы с занулением через сопротивление и многократными заземлителями будут безопаснее систем с изолированной нулевой точкой трансформаторов, не имеющих защиты от замыкания на землю.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Граматчиков А. С.—Техника безопасности в электрических установках, ОНТИ—НКТП—СССР 1938.
 2. Копытов Н. В.—Условия безопасности кабельных фабрично-заводских сетей низкого напряжения, „Электричество“, № 15, стр. 848—854, 1931.
 3. Вайнер А. Л.—Заземления, ОНТИ—НКТП—СССР, 1938.
 4. Подальский А. П.—Влияние заземления нейтрали сетей низкого напряжения на условия безопасности, Госэнергоиздат, 1946.
 5. Федоренко В. М.—Методы борьбы с преждевременным взрыванием электродетонаторов блуждающими токами в шахтах, МакНИИ, 1939.
-